

西藏改则县拉果错蛇绿岩构造属性:来自岩石学、地球化学、年代学及 Lu-Hf 同位素的制约

徐建鑫¹, 李 才², 范建军², 王 明², 解超明²

XU Jianxin¹, LI Cai², FAN Jianjun², WANG Ming², XIE Chaoming²

1. 武警黄金第三支队, 黑龙江 哈尔滨 150006;

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061

1. No. 3 Gold Geological Party, CAPF, Harbin 150006, Heilongjiang, China;

2. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China

摘要:拉果错蛇绿岩是狮泉河-阿索-嘉黎蛇绿岩带中出露最完整的蛇绿岩组合之一,对恢复和反演该缝合带所代表洋盆演化具有重要意义。然而,目前拉果错蛇绿岩的成因及构造环境还不清楚,时代也存在争议。选择拉果错蛇绿岩中的斜长花岗岩和堆晶辉长岩作为研究对象,开展了野外勘查及剖面的测制,以及地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素研究,并结合区域地层、岩浆岩等相关资料,探讨了拉果错蛇绿岩的构造属性。拉果错斜长花岗岩和辉长岩野外呈整合接触,地球化学特征表明二者具有同源性,具有与 E-MORB(富集大洋中脊玄武岩)相似的稀土元素配分形式和微量特征;Lu-Hf 同位素显示岩浆源区为亏损地幔,由多种组分组成,可能来源于亏损地幔和 II 型富集地幔二组分混合的地幔源区;斜长花岗岩和辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分别获得 184.1 ± 0.79 Ma 和 183.5 ± 2.2 Ma 的谐和年龄,代表了拉果错蛇绿岩的形成时代。研究表明,拉果错蛇绿岩形成于具有强烈大洋中脊玄武岩特征的弧后盆地环境。

关键词:青藏高原;狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿岩带;拉果错蛇绿岩

中图分类号: P588.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2018)08-1541-13

Xu J X, Li C, Fan J J, Wang M, Xie C M. Tectonic property of the Laguocuo ophiolite in Gerze County, Tibet: Constrains from petrology, geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(8):1541-1553

Abstract: Laguocuo ophiolite is one of the most complete ophiolite combinations in the Shiquanhe-Yongzhu-Jiali ophiolitic belt, and has great significance for restoring the evolution of the oceanic basin. However, the studies of the Laguocuo ophiolite are poor, resulting in the unclear genesis and controversial age. In this paper, the authors conducted field survey, profile measurement, geochemical survey, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope analysis on the plagioclase granite and gabbro cumulates of the Laguocuo ophiolite so as to study the tectonic property of the Laguocuo ophiolite. Plagioclase granite and gabbro cumulate of Laguocuo ophiolite exhibit direct contact in the field, and their geochemistry data show that they are of the same source with similar REE patterns that are similar to features of the E-MORB. Lu-Hf isotope analysis shows that their magmatic source is the depleted mantle, and shows a plurality of components, which might have resulted from the mixing of DM and EM2. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yielded concordia ages of 184.1 ± 0.79 Ma and 183.5 ± 2.2 Ma. The authors have reached the conclusion that Laguocuo ophiolite

收稿日期:2018-01-10;修订日期:2018-04-20

资助项目:国家自然科学基金项目《青藏高原羌塘南部埃迪卡拉纪地层研究》(批准号:41602230)、《班公湖-怒江洋早白垩世演化:来自复理石沉积的制约》(批准号:41702227)和中国地质调查局项目《班公湖-怒江成矿带铜多金属矿资源基地调查》(编号:DD20160026)、《冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地调查》(编号:DD20160015)

作者简介:徐建鑫(1989-),男,硕士,工程师,构造地质学专业。E-mail: xujianxin8888@163.com

通讯作者:李才(1953-),男,教授,博士生导师,从事青藏高原大地构造与区域地质研究。E-mail: licai010@126.com

lite was formed in a back-arc ocean basin with strong MORB characteristics.

Key words: Tibetan Plateau; Shiquanhe-Yongzhu-Jiali ophiolitic belt; Laguocuo ophiolite

拉果错蛇绿岩位于藏北阿里地区改则县南 30km 拉果错一带,属于狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿岩带的一部分。近年来,拉果错蛇绿岩得到国内外学者的高度关注,并对其形成了不同的认识。林文第等^[1]认为,拉果错蛇绿岩系改则-色哇缝合带内的蛇绿岩套组成部分,而后伴随白垩纪后的断裂活动呈推覆体出露于拉果错弧后盆地;西藏地质矿产局等^[2]认为,该蛇绿岩是班公湖-怒江缝合带洞错蛇绿岩南向俯冲的构造推覆体;肖序常^[3]、张玉修^[4]等认为,该蛇绿岩属班公湖-怒江缝合带的一个组成部分、一个分支;潘桂棠等^[5-7]、李金高等^[8]则认为,拉果错蛇绿岩是冈底斯造山带中班公湖-怒江缝合带与雅鲁藏布江缝合带之间的一条独立的弧-弧碰撞带的产物。针对拉果错蛇绿岩的构造环境也存在不同见解;1:25 万改则幅和王保弟等认为,拉果错蛇绿岩形成于弧间盆地环境^[9-10]。1:5 万拉果错幅和樊帅权等认为,拉果错蛇绿岩形成于俯冲带上的构造环境,属 SSZ 型蛇绿岩^{[11]①}。拉果错蛇绿岩的形成时代更是众说纷纭,已知的同位素年龄有:斜长花岗岩 K-Ar 年龄为 124Ma,锆石 U-Pb 年龄为 183~155Ma^[9];辉长岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 125Ma^②;斜长花岗岩 SHRIMP 锆石年龄为

167Ma^[4];斜长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 年龄为 190Ma^[11];硅质岩放射虫的时代为晚侏罗世。本文在前人研究的基础上,通过野外实地考察、剖面测制,并结合年代学、地球化学及 Lu-Hf 同位素研究,探讨拉果错蛇绿岩的构造属性、时代归属及源区性质。

1 地质背景

拉果错蛇绿岩大地构造位置隶属班公错-怒江结合带南侧、冈底斯-念青唐古拉板片北侧(图 1)、狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿岩带的中段,主要由超基性杂岩、辉长杂岩、基性岩墙、基性火山杂岩、斜长岩、放射虫硅质岩等构造单元组成,但多已被构造肢解,同时伴有花岗闪长岩、闪长岩、石英闪长岩等侵入体出露;拉果错蛇绿岩南北两侧均与下白垩统郎山组断层接触。

2 拉果错蛇绿岩岩石学特征

为明确拉果错蛇绿岩的岩石组合,在拉果错以北测制了拉果错蛇绿岩构造剖面(图 2)。剖面起点坐标:北纬 32.08°、东经 84.17°、高程 4493.60m;终点坐标:北纬 32.09°、东经 84.17°、高程 4544.4m。

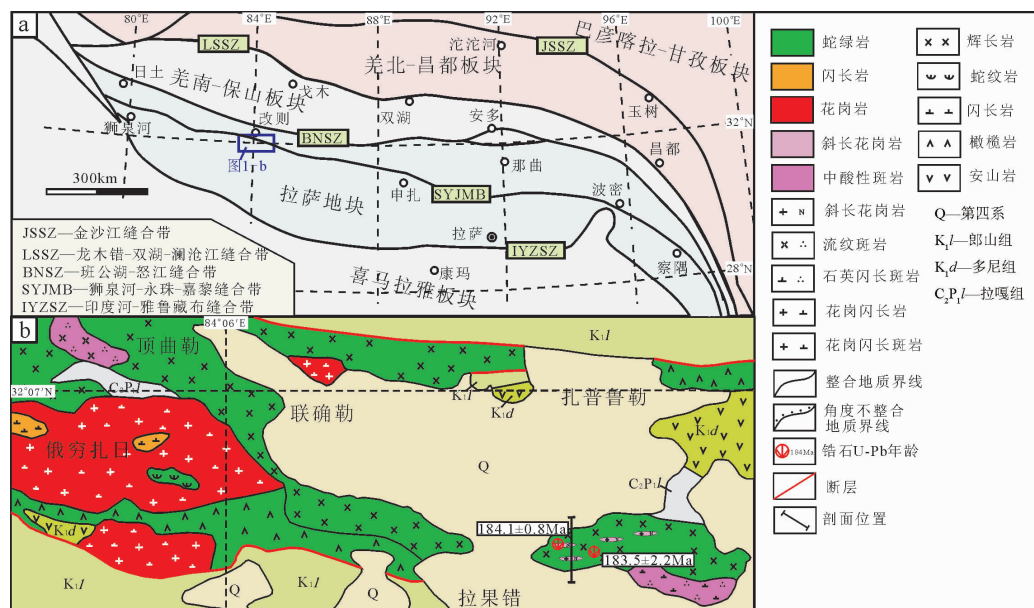


图 1 西藏拉果错地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Laguocuo area, Gerze County, Tibet

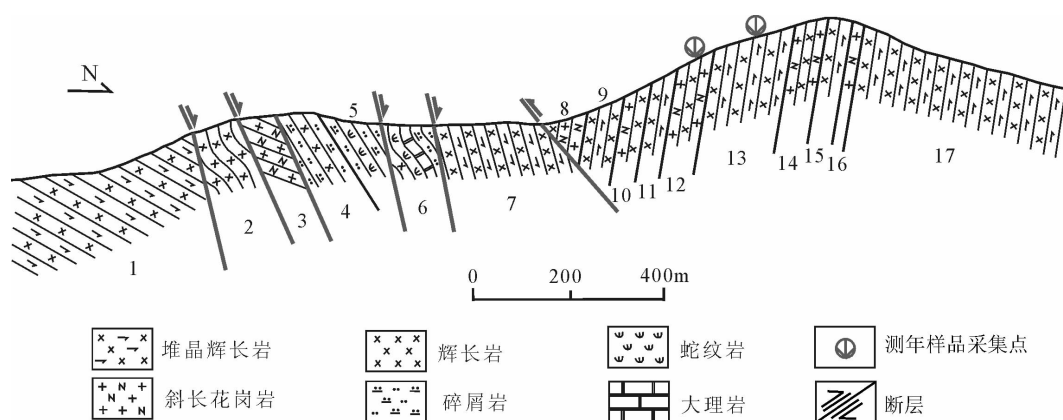


图2 西藏改则县拉果错蛇绿岩构造剖面

Fig. 2 Tectonic profile of Laguocuo ophiolite in Gerze County, Tibet

拉果错蛇绿岩岩石组合较复杂,剖面中可见蛇纹岩(Oph1)、堆晶辉长岩(Oph2)、席状岩墙(Oph3)、斜长花岗岩、硅质岩等不同端元组分。各端元详细描述如下。

斜长花岗岩:空间上,斜长花岗岩与堆晶辉长岩呈互层的堆晶结构产出,二者接触处未见冷凝边与烘烤边(图版 I-a)。斜长花岗岩单层厚度在几十厘米至几米不等,中细粒花岗结构,矿物成分主要为斜长石(约50%)、角闪石(5%~10%)及少量副矿物(榍石、锆石),显微镜下见斜长石斑晶(图版 I-b)。部分斜长花岗岩遭受蚀变,见矿物定向分布及云母、绿帘石等变质矿物出现。

辉长岩野外进一步分为2种,一种是与斜长花岗岩互层产出的堆晶辉长岩;另一种为辉长岩墙,多呈块状产出,少数为片状,发生糜棱岩化(图版 I-c)。矿物多发生定向拉长,见宽缓的小褶皱及透镜体、旋转残斑、石香肠构造、共轭剪节理等构造现象。显微镜下辉长岩为辉长结构(图版 I-d),块状构造,但大部分辉石已蚀变为角闪石。

蛇纹岩野外破碎强烈,多呈球状碎块产于片理化砂岩之中(图版 I-e)。显微镜下蛇纹岩为片状变晶结构,块状构造,矿物成分主要为蛇纹石(95%以上)、斜绿泥石(3%)及不透明矿物(可能为磁铁矿、褐铁矿)。

大理岩及硅质岩,二者为蛇绿岩的上覆盖层,大理岩产于蚀变带中,破碎较强烈,多呈碎块产出。显微镜下大理岩为变晶结构(图版 I-f),块状构造,矿物成分以方解石为主,含量在95%以上。野外硅质岩

成层产出,单层厚度为3~5cm(图版 I-g)。

3 测试方法

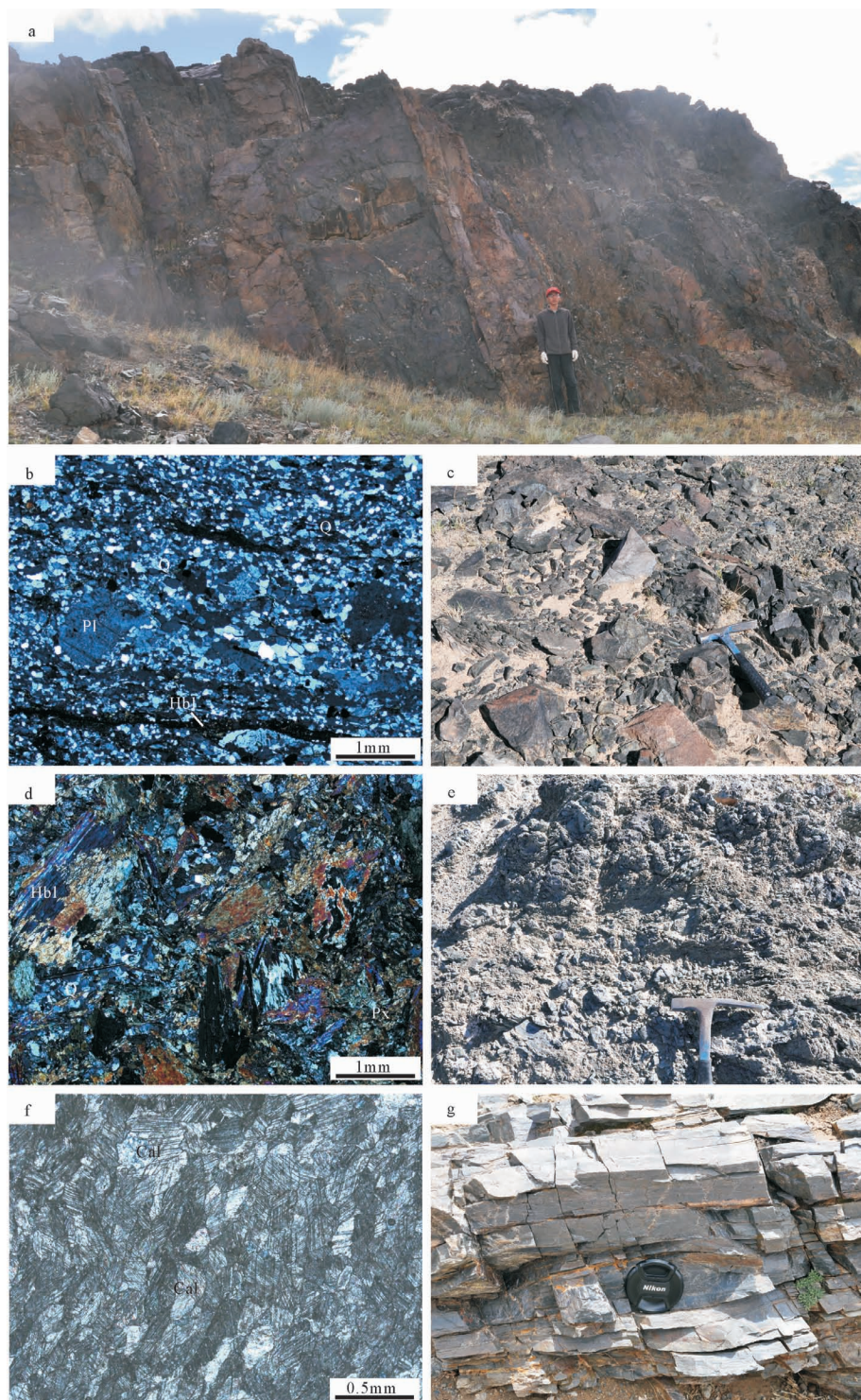
3.1 全岩地球化学

为了探讨拉果错蛇绿岩的构造属性,采集了15件斜长花岗岩样品和12件辉长岩样品进行全岩地球化学分析。分析过程如下:将野外采集的样品敲碎,挑选出其中较为新鲜的碎块,为防止混样和污染,将样品分别放入写好编号的干净的样品袋中,将样品送到河北省地质调查研究院实验室经过无污染碎样至粉末状。地球化学样品的主量、微量和稀土元素分析均在中国地质大学(北京)地学实验中心完成;主量元素采用X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)分析^[12],测试步骤包括烘样、称样、熔样、冷却、稀释、上机测试,SiO₂的分析精度为1%,其他氧化物的精度在4%~10%之间。微量元素和稀土元素化学预处理采用两酸(HNO₃+HF)高压反应釜溶样方法,分析仪器为Ahlmt 7500a型等离子质谱仪,测试步骤包括称样、初溶、复溶、定容(稀释1000倍)、上机测试。实验室分析详细方法见参考文献[13]。

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

为了确定拉果错蛇绿岩的时代,野外采集了斜长花岗岩(L13T1)和堆晶辉长岩(L13T2)2件年龄样品进行LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析。锆石的挑选在河北省廊坊市区域地质调查院完成,样品靶的制备在中国地质大学(北京)进行,阴极发光(CL)图像拍摄在北京大学物理学院实验室完成,仪

图版 I Plate I



a.斜长花岗岩与堆晶辉长岩互层照片;b.斜长花岗岩镜下照片(正交偏光);

c.辉长岩野外照片;d.辉长岩镜下照片(正交偏光);e.蛇纹岩野外照片;

f.大理岩镜下照片(正交偏光);g.硅质岩照片。

Cal—方解石;Q—石英;Hbl—角闪石;Px—辉石;Pl—斜长石

器选用 7500a 型 ICP-MS (美国 Agilent 科技有限公司), 激光剥蚀系统选用 UP193SS 型深紫外 (DUV) 193nm 和 ArF 准分子激光剥蚀系统 (美国 New Wave 贸易有限公司), 采用直径为 36 μ m 的激光束斑, 实验载气为氦, 流速为 0.7L/min。详细的数据处理方法和分析步骤见参考文献[14]。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素地球化学分析

锆石 Lu-Hf 同位素原位分析在中国科学院青藏高原研究所完成, 将已获得谐和年龄的锆石靶作为分析对象, 实验仪器选用激光剥蚀多接受杯等离子质谱仪 (MC-ICP-MS) 和 193nm 激光取样系统, 分析时选用直径为 60 μ m 的激光束, 激光剥蚀时间为 30s。详细仪器操作条件和分析方法见参考文献[15-16]。分析数据的离线处理采用软件 ICP-MS Data Cal 完成。

4 地球化学特征

4.1 斜长花岗岩

斜长花岗岩地球化学数据见表 1。斜长花岗岩的烧失量较低, 介于 0.41%~1.1% 之间, 平均值为

0.72%, 说明样品较新鲜。SiO₂ 含量较高, 为 69.7%~79.75%, 平均为 74.64%; Fe₂O₃ 含量为 2.38%~5.07%, 平均值为 3.29%; MgO 含量为 0.33%~1.52%, 平均值为 0.72%; Mg[#] 值为 17.1~46.0, 平均值为 32.8; TiO₂ 含量为 0.15%~0.47%, 平均值为 0.23%; Al₂O₃ 含量为 9.4%~13.87%, 平均值为 12.23%; 富 Na₂O (3.78%~6.93%), 贫 K₂O (0.04%~0.36%), 且具有较高的 Na₂O/K₂O 值 (15~176); A/CNK 值在 0.79~1.10 之间, 与奥长花岗岩类似。

斜长花岗岩的稀土元素总量 Σ REE 为 40.45×10^{-6} ~ 101.78×10^{-6} , 平均值为 83.57×10^{-6} , Σ LREE/ Σ HREE 值为 0.85~1.61, 平均值为 1.02, (La/Yb)_N 值为 1.29~3.02, 平均值为 1.81, δ Eu 值为 0.6~1.2 之间, 平均值为 0.74, 表明经历了微弱的斜长石分离结晶作用。在稀土元素配分曲线图 (图 3-a) 上, 斜长花岗岩表现出轻稀土元素微弱富集, 重稀土元素较平坦的特点, 与典型的 E-MORB 曲线相似; 在原始地幔标准化蛛网图 (图 3-b) 中, 斜长花岗岩富集 Th、U、Pb、Zr 和 Hf, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti。Th、U、

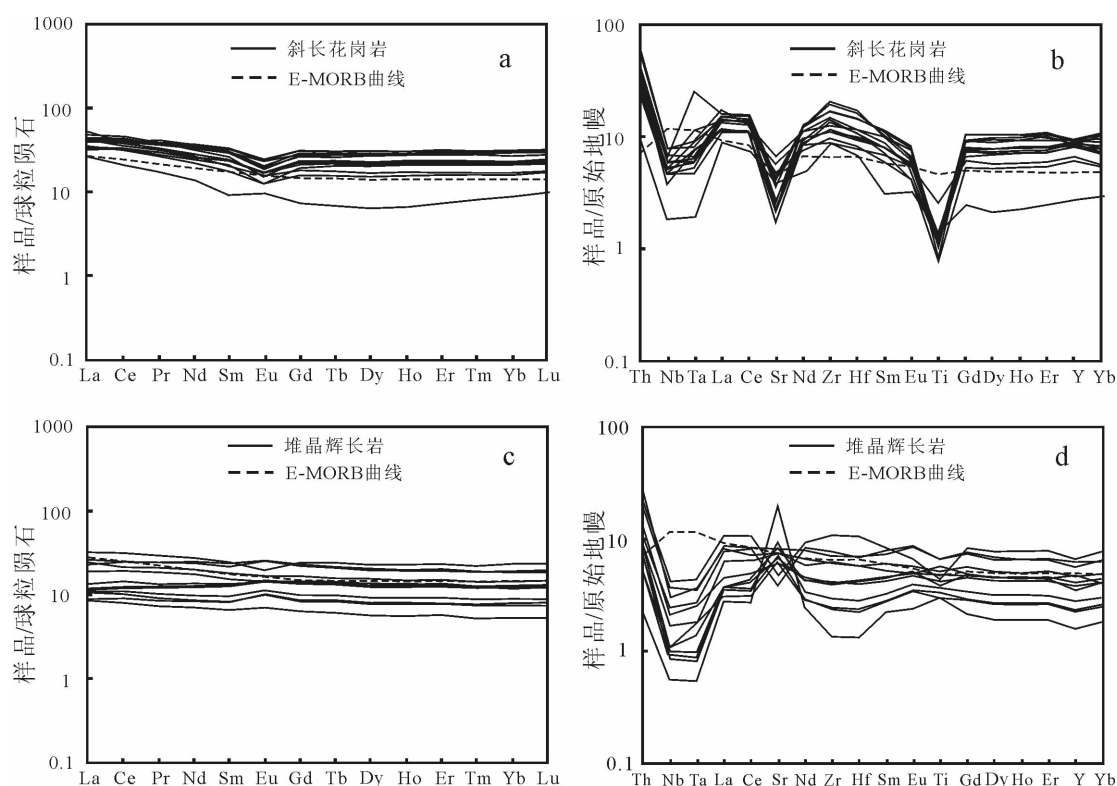


图 3 拉果错斜长花岗岩和辉长岩的稀土元素配分曲线 (a、c) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b、d)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive-mantle-normalized trace element spidergrams (b, d) of Laguocuo plagioclase granite and gabbro

表1 拉果错斜长花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace and rare earth elements data for the Laguocuo plagioclase granite

样品号	L ₁₃ T ₁ H ₅	L ₁₃ T ₁ H ₄	L ₁₃ T ₁ H ₃	L ₁₃ T ₁ H ₂	L ₁₃ T ₁ H ₁	L ₁₄ T ₁ H ₁	L ₁₄ T ₁ H ₂	L ₁₄ T ₁ H ₃	L ₁₄ T ₁ H ₄	L ₁₄ T ₁ H ₅	L ₁₄ T ₁ H ₆	L ₁₄ T ₁ H ₇	L ₁₄ T ₁ H ₈	L ₁₄ T ₁ H ₉	L ₁₄ T ₁ H ₁₀
SiO ₂	74.47	74.24	75.45	74.03	74.30	76.46	77.58	74.37	71.96	74.36	75.44	79.75	69.70	75.01	72.43
TiO ₂	0.23	0.20	0.21	0.24	0.22	0.19	0.15	0.25	0.21	0.22	0.22	0.15	0.47	0.21	0.25
Al ₂ O ₃	12.95	12.83	12.41	12.69	12.86	11.16	10.34	12.47	13.87	12.74	10.99	9.40	13.84	11.77	13.20
Fe ₂ O ₃	3.44	3.10	2.72	4.04	3.45	2.98	2.38	2.70	3.23	3.24	3.30	2.72	5.07	3.24	3.75
MnO	0.06	0.03	0.04	0.10	0.07	0.04	0.04	0.04	0.06	0.07	0.06	0.05	0.26	0.07	0.10
MgO	0.84	0.33	0.55	0.36	0.55	1.00	0.58	0.99	0.78	0.62	0.93	0.33	1.52	0.59	0.82
CaO	0.91	1.58	1.43	1.63	1.43	0.76	1.55	1.70	1.84	1.10	1.20	2.27	1.77	2.56	1.77
Na ₂ O	6.74	6.31	6.18	5.92	5.99	6.20	6.04	6.13	6.66	6.72	6.93	3.78	5.47	5.39	6.31
K ₂ O	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.29	0.12	0.24	0.06	0.07	0.13	0.36	0.19	0.12
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.06	0.04	0.05	0.07	0.03	0.11	0.04	0.08
LOI	0.92	0.96	0.71	0.60	0.71	0.74	0.65	0.80	0.78	0.45	0.41	0.58	1.10	0.57	0.81
Li	3.96	5.60	3.36	4.13	5.18	3.91	3.22	7.82	9.01	3.38	4.01	4.12	14.42	4.77	5.89
Sc	148.00	136.00	146.00	129.00	164.00	182.70	157.80	271.30	204.40	258.00	314.90	189.50	455.10	210.10	349.20
V	438.00	690.00	597.00	746.00	840.00	648.50	2520.00	1176.30	2055.60	728.70	904.50	1300.00	3004.20	1647.90	1175.40
Cr	13.54	11.39	12.19	15.22	13.40	11.99	7.29	4.92	11.18	11.91	10.14	11.50	14.69	11.34	15.12
Co	1499.00	1282.00	1413.00	1526.00	1468.00	1481.20	1013.50	1801.80	1439.20	1576.40	1737.40	1052.10	3334.80	1447.60	1846.60
Ni	11.85	5.72	6.61	4.12	4.99	16.57	100.91	22.56	11.29	4.51	12.71	39.65	33.73	60.62	10.02
Cu	9.51	3.14	2.07	1.57	3.95	7.85	5.86	2.72	3.33	1.98	5.69	9.82	3.96	3.29	2.69
Zn	368.40	209.00	300.00	738.00	508.00	399.40	304.30	311.40	526.20	622.20	584.40	482.60	2381.60	585.90	934.30
Ga	1.84	1.67	1.55	0.57	0.82	1.60	2.66	3.20	1.69	0.81	0.92	0.50	3.98	0.99	1.14
Rb	2.83	2.05	1.06	2.26	2.59	3.24	2.58	1.70	1.64	1.42	3.33	5.54	1.94	1.01	1.59
Sr	3.46	26.56	9.72	1.57	7.41	25.17	2.89	42.92	18.96	1.37	1.33	0.48	29.08	1.17	5.49
Y	67.94	16.71	25.44	61.26	56.06	43.18	12.31	25.51	40.10	54.63	64.19	22.10	229.50	27.86	78.68
Zr	194.86	213.15	232.80	188.24	184.54	151.33	106.32	99.06	158.10	133.43	159.44	140.99	99.71	119.03	121.74
Nb	4.13	5.57	5.67	4.16	4.86	3.63	2.63	1.30	4.66	3.46	4.29	3.83	3.39	3.17	3.66
Cs	1.78	4.45	3.33	1.56	1.50	0.34	1.76	0.47	5.82	1.52	0.65	2.05	4.55	2.36	1.46
Ba	18.54	10.10	16.07	47.84	25.80	12.26	17.73	46.53	20.70	6.89	13.63	14.75	126.37	8.97	22.09
La	10.07	12.02	10.26	9.47	10.06	7.62	8.09	6.12	11.08	8.07	9.28	9.41	9.94	7.71	9.81
Ce	25.14	23.81	26.48	24.58	25.26	19.50	19.44	13.03	27.86	20.40	23.77	23.65	22.05	19.58	22.90
Pr	3.42	3.76	3.55	3.46	3.61	2.57	2.52	1.63	3.60	2.81	3.08	3.43	2.89	2.78	3.10
Nd	15.69	16.33	15.73	16.32	16.96	10.96	10.19	6.44	14.72	12.25	13.00	15.10	11.70	12.14	12.95
Sm	4.49	4.37	4.52	4.94	5.02	3.17	2.66	1.38	3.94	3.59	3.54	4.46	3.06	3.57	3.58
Eu	1.14	1.12	1.06	1.35	1.39	0.71	0.70	0.55	0.85	0.93	0.93	1.30	0.87	0.94	0.97
Gd	5.74	5.36	5.58	6.30	6.35	3.92	3.15	1.48	4.72	4.42	4.35	5.65	3.67	4.58	4.40
Tb	1.00	0.97	1.01	1.11	1.12	0.76	0.58	0.25	0.85	0.82	0.81	1.03	0.65	0.86	0.79
Dy	6.93	6.90	7.01	7.72	7.71	5.05	3.79	1.58	5.56	5.43	5.43	6.68	4.23	5.71	5.10
Ho	1.52	1.56	1.55	1.69	1.69	1.16	0.87	0.37	1.26	1.25	1.25	1.53	0.95	1.31	1.16
Er	4.69	4.92	4.85	5.19	5.14	3.46	2.59	1.20	3.68	3.67	3.70	4.49	2.78	3.87	3.40
Tm	0.69	0.73	0.73	0.77	0.76	0.54	0.41	0.20	0.58	0.57	0.56	0.70	0.42	0.59	0.52
Yb	4.73	5.07	5.05	5.28	5.23	3.56	2.64	1.45	3.77	3.68	3.69	4.45	2.82	3.85	3.45
Lu	0.71	0.76	0.76	0.80	0.78	0.56	0.42	0.25	0.60	0.58	0.57	0.69	0.45	0.60	0.54
Hf	5.16	4.94	5.29	4.49	4.41	3.32	2.52	2.11	3.42	3.02	3.38	3.62	2.39	2.95	2.83
Ta	0.25	0.37	0.33	0.47	0.27	0.26	0.30	0.08	1.04	0.31	0.26	0.25	0.21	0.19	0.36
Pb	0.97	2.35	2.16	1.57	1.67	0.68	2.21	1.30	3.94	0.66	1.32	2.49	1.85	2.42	1.31
Th	3.14	4.94	4.94	2.70	2.74	2.47	2.67	0.81	3.80	2.11	2.94	2.24	3.26	2.03	2.72
U	0.58	1.01	0.91	0.55	0.60	0.59	0.68	0.23	0.99	0.51	0.67	0.49	0.80	0.54	0.64

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量为10⁻⁶

Pb 的富集与壳源及沉积物的加入有关, Nb、Ta、Ti 的强烈亏损被认为与俯冲作用有关。

4.2 堆晶辉长岩

辉长岩地球化学数据见表 2。部分样品烧失量较高,说明岩石蚀变强烈,与镜下观察相符。去除烧失量重新换算后, SiO_2 含量为 43.4%~54.9%, 平均值为 49.27%; Fe_2O_3 含量为 9.88%~11.65%, 平均值为 10.66%; MgO 含量为 3.77%~9.71%, 平均值为 6.87%; $\text{Mg}^\#$ 值为 43.3~68.6, 平均值为 58.5; TiO_2 含量为 0.66%~1.48%, 平均值为 0.96%; Al_2O_3 含量为 15.83%~24.61%, 平均值为 18.72%; 富 Na_2O (3.16%~7.06%), 贫 K_2O (0.15%~1.46%), 且具有较高的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值 (2~40, 平均值为 15)。

堆晶辉长岩的稀土元素总量 $\sum \text{REE}$ 为 18.35×10^{-6} ~ 74.85×10^{-6} , 平均值为 41.99×10^{-6} , $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 值为 0.73~1.01, 平均值为 0.88, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.59~1.91, 平均值为 1.28, δEu 值为 0.81~1.22, 平均值为 1.07, 表明没有发生明显的斜长石分离结

晶作用。在稀土元素配分曲线图(图 3-c)上, 堆晶辉长岩以平坦型为主, 与典型的 E-MORB (富集型大洋中脊玄武岩) 曲线相似, 无 Eu 异常。在原始地幔标准化蛛网图(图 3-d)中, 堆晶辉长岩富集 Th、U、Pb、Sr, 亏损 Ba、Nb、Ta, 可能与俯冲作用有关。

5 拉果错蛇绿岩年代学研究

5.1 锆石特征

阴极发光图像显示(图 4), L13T1 样品锆石粒度在 100~200 μm 之间, 长宽比在 1:1~2:1 之间, 锆石多呈棱角状、不规则状, 可见明显的岩浆成因的振荡环带, 锆石内部无残留的老核, 外部未见变质边, 岩浆锆石特征较明显。L13T2 样品锆石粒度在 50~150 μm 之间, 长宽比约 1:1, 锆石多呈浑圆状、板状, 可见微弱的岩浆振荡环带, 环带较宽缓, 部分具有暗色的变质边, 呈现出了核-幔结构。

5.2 分析结果

斜长花岗岩和堆晶辉长岩 LA-ICP-MS 锆石

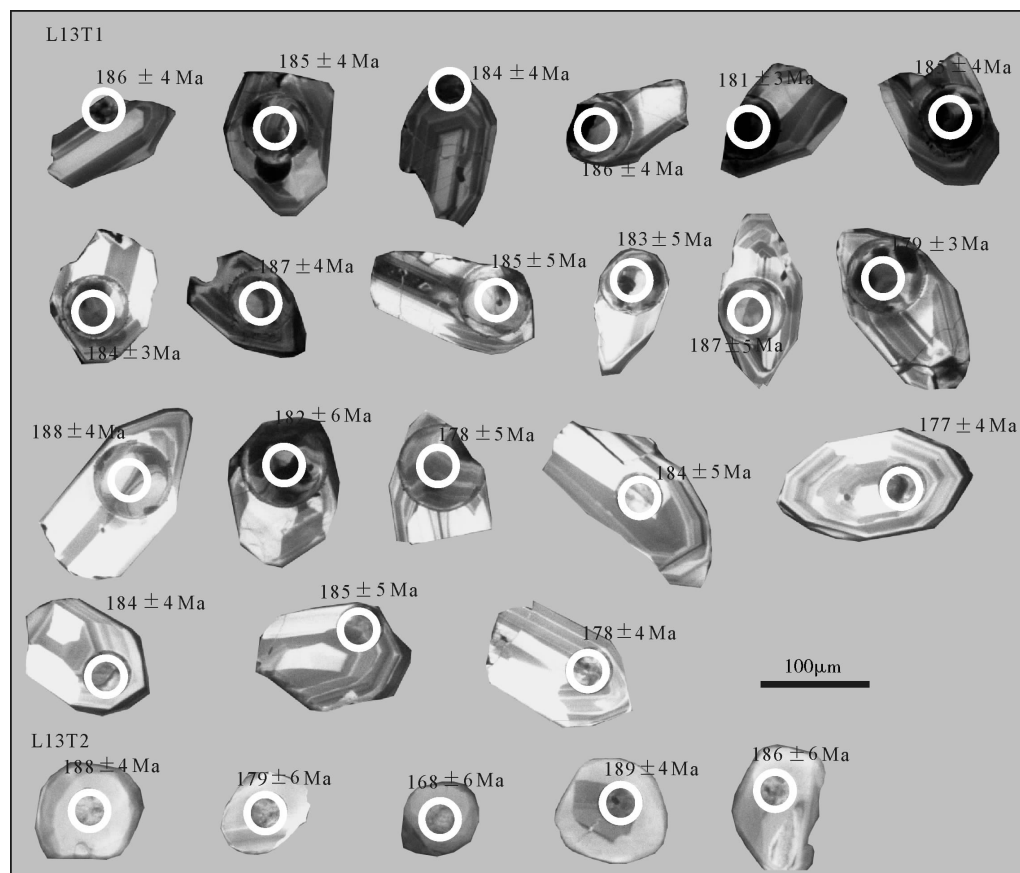


图 4 拉果错斜长花岗岩和辉长岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 CL images for Laguocuo plagioclase granite and gabbro

表2 拉果错堆晶辉长岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth element data for the Laguocuo gabbro cumulates

样品号	L ₁₅ T ₂ H ₃	L ₁₅ T ₂ H ₂	L ₁₅ T ₂ H ₁	L ₁₄ T ₂ H ₁	L ₁₄ T ₂ H ₂	L ₁₄ T ₂ H ₃	L ₁₄ T ₂ H ₄	L ₁₄ T ₂ H ₅	L ₁₄ T ₂ H ₇	L ₁₄ T ₂ H ₈	L ₁₄ T ₂ H ₉	L ₁₄ T ₂ H ₁₀
SiO ₂	50.98	53.17	54.33	42.32	44.70	54.94	53.25	46.42	45.90	46.02	43.41	45.07
TiO ₂	0.94	1.02	1.38	0.69	0.65	0.98	1.48	0.94	0.90	0.90	0.74	0.71
Al ₂ O ₃	17.33	17.53	15.83	24.00	19.02	16.52	17.22	15.33	18.82	19.40	19.93	19.54
Fe ₂ O ₃	11.51	10.37	11.51	9.64	10.12	9.97	10.88	9.67	10.62	10.57	10.62	10.16
MnO	0.20	0.20	0.21	0.12	0.17	0.18	0.20	0.22	0.18	0.18	0.17	0.18
MgO	5.46	4.39	3.78	5.92	9.42	5.47	3.95	7.29	8.30	8.02	9.24	9.52
CaO	4.88	4.55	3.64	9.77	7.57	3.93	5.44	7.20	7.20	6.52	8.50	6.80
Na ₂ O	5.57	6.17	7.07	3.09	4.23	6.16	5.89	3.52	4.79	5.61	4.17	4.24
K ₂ O	0.49	0.18	0.26	1.43	1.23	0.15	0.21	0.91	0.92	0.38	0.99	1.17
P ₂ O ₅	0.07	0.11	0.19	0.03	0.04	0.07	0.19	0.11	0.05	0.07	0.05	0.04
烧失量	1.26	1.09	0.85	2.49	2.28	0.80	0.49	8.20	1.70	1.67	1.60	1.99
Li	9.69	12.62	8.32	40.68	43.07	16.85	11.80	16.82	25.06	24.97	31.44	39.51
Sc	269.00	384.00	723.00	153.50	220.50	305.30	733.00	492.50	217.70	285.70	246.20	225.40
V	4144.00	1601.00	2156.00	10854.10	10180.00	1640.00	2107.00	8124.80	6981.00	3613.90	8695.00	10010.00
Cr	43.26	35.04	32.70	33.03	38.93	26.32	30.32	43.70	31.25	34.53	40.50	38.93
Co	6118.00	6320.00	8382.00	3785.80	3786.00	5580.00	8454.00	7334.00	4747.20	5303.10	4522.80	4341.60
Ni	388.40	314.00	263.00	416.30	282.40	283.90	261.20	347.40	301.80	284.20	319.00	315.20
Cu	18.32	4.93	2.89	58.38	116.48	131.04	8.90	42.33	55.98	68.16	98.59	89.96
Zn	1514.80	1436.40	1532.20	851.00	1291.00	1311.70	1510.60	1953.30	1212.40	1403.40	1384.50	1426.10
Ga	32.82	22.04	22.18	43.35	49.64	27.49	21.00	40.22	41.40	44.65	50.78	50.97
Rb	7.87	3.15	1.48	21.36	40.52	40.91	4.08	39.50	27.54	32.04	37.16	34.94
Sr	10.15	156.18	11.92	2.28	35.95	22.84	9.91	38.22	57.47	35.44	40.86	40.83
Y	85.80	208.20	90.58	38.38	66.87	97.79	59.27	100.28	70.31	80.51	73.28	72.81
Zr	44.81	67.76	86.50	14.71	25.92	117.88	76.68	69.52	44.28	45.60	31.91	27.11
Nb	1.55	2.05	1.73	0.39	0.59	2.91	2.54	1.17	0.64	0.74	0.78	0.76
Cs	4.25	3.46	5.59	9.70	2.26	1.47	3.47	2.72	1.68	1.25	4.88	4.90
Ba	75.86	51.74	23.16	109.85	274.14	37.69	28.49	195.18	149.65	43.71	198.00	268.92
La	3.06	5.48	5.32	1.93	2.42	7.25	5.97	4.31	2.52	2.48	2.46	2.10
Ce	8.57	12.83	14.76	4.73	6.02	18.48	14.59	11.24	7.08	6.87	6.39	5.48
Pr	1.21	1.92	2.23	0.67	0.84	2.67	2.20	1.70	1.10	1.08	0.91	0.79
Nd	6.08	9.05	11.31	3.19	3.88	12.34	10.56	7.84	5.64	5.52	4.31	3.78
Sm	1.99	2.68	3.44	0.96	1.20	3.64	3.19	2.27	1.89	1.84	1.39	1.21
Eu	0.82	0.94	1.44	0.40	0.56	1.11	1.40	0.81	0.82	0.80	0.63	0.57
Gd	2.82	3.32	4.50	1.25	1.66	4.80	4.34	2.87	2.68	2.68	1.95	1.72
Tb	0.49	0.57	0.76	0.22	0.30	0.88	0.75	0.51	0.49	0.49	0.35	0.31
Dy	3.37	3.75	5.04	1.38	1.89	5.61	4.78	3.30	3.16	3.07	2.22	1.97
Ho	0.73	0.80	1.07	0.30	0.42	1.25	1.06	0.74	0.69	0.68	0.50	0.44
Er	2.20	2.44	3.21	0.91	1.23	3.73	3.09	2.11	2.07	2.01	1.45	1.27
Tm	0.32	0.35	0.46	0.13	0.18	0.56	0.46	0.31	0.30	0.30	0.21	0.19
Yb	2.16	2.36	3.06	0.87	1.21	3.83	3.11	1.94	2.00	1.98	1.44	1.30
Lu	0.32	0.35	0.45	0.13	0.18	0.58	0.48	0.30	0.30	0.30	0.21	0.20
Hf	1.30	1.80	2.10	0.40	0.67	3.21	2.10	1.78	1.28	1.21	0.83	0.71
Ta	0.10	0.14	0.11	0.02	0.03	0.17	0.14	0.07	0.04	0.04	0.06	0.07
Pb	2.77	8.97	1.62	0.61	0.89	2.54	2.14	2.18	0.69	0.97	0.73	0.77
Th	1.11	2.23	0.92	0.19	0.62	1.91	1.61	0.74	0.48	0.48	0.73	0.61
U	0.29	0.44	0.27	0.06	0.12	0.30	0.28	0.21	0.10	0.17	0.13	0.13

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量为10⁻⁶

U-Pb 测年数据见表 3 和表 4。斜长花岗岩锆石测点的 Th 含量为 $49.65 \times 10^{-6} \sim 517.17 \times 10^{-6}$, U 含量为 $18.7 \times 10^{-6} \sim 301.16 \times 10^{-6}$, Th/U 平均值为 0.7, 具有酸性岩浆锆石的特征。24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较集中(图 5), 年龄加权平均值为 $184.1 \pm 0.79\text{Ma}$

(MSWD=0.005), 代表了拉果错斜长花岗岩的岩浆结晶年龄(早侏罗世晚期)。

堆晶辉长岩锆石测点的 Th 含量为 $0.08 \times 10^{-6} \sim 190.39 \times 10^{-6}$, U 含量为 $59.03 \times 10^{-6} \sim 193.08 \times 10^{-6}$, Th/U 平均值为 0.59, 具有基性岩浆锆石的特征。5 个测

表 3 拉果错斜长花岗岩锆石 U-Th-Pb 同位素测年数据(L13T1)

Table 3 Zircon U-Th-Pb data of the Laguocuo plagioclase granite (L13T1)

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb _{rad}	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
01	2	77	54	0.7038	0.0498	0.0066	0.2009	0.0263	0.0293	0.0007	185	249	186	22	186	4
02	3	104	71	0.6849	0.0544	0.0068	0.2185	0.0270	0.0291	0.0007	387	236	201	23	185	4
03	3	99	60	0.6017	0.0496	0.0049	0.1978	0.0192	0.0289	0.0006	178	180	183	16	184	4
04	6	171	98	0.5740	0.0498	0.0032	0.2107	0.0135	0.0307	0.0006	187	109	194	11	195	4
05	3	86	45	0.5268	0.0498	0.0055	0.2013	0.0222	0.0293	0.0006	184	207	186	19	186	4
06	4	126	92	0.7368	0.0498	0.0039	0.1951	0.0151	0.0284	0.0006	183	138	181	13	181	3
07	3	93	53	0.5654	0.0499	0.0044	0.2001	0.0174	0.0291	0.0006	191	157	185	15	185	4
08	10	265	301	1.1371	0.0499	0.0026	0.1998	0.0103	0.0290	0.0005	190	87	185	9	184	3
09	4	133	104	0.7847	0.0497	0.0051	0.1980	0.0202	0.0289	0.0006	181	191	183	17	184	4
10	4	132	103	0.7838	0.0498	0.0049	0.2023	0.0197	0.0294	0.0006	188	180	187	17	187	4
11	2	67	41	0.6066	0.0498	0.0094	0.2002	0.0376	0.0291	0.0008	187	317	185	32	185	5
12	3	99	62	0.6289	0.0495	0.0066	0.1903	0.0253	0.0279	0.0007	170	249	177	22	177	4
13	2	73	42	0.5747	0.0499	0.0099	0.1980	0.0389	0.0288	0.0008	191	328	183	33	183	5
14	3	109	56	0.5146	0.0499	0.0064	0.2029	0.0257	0.0295	0.0007	189	235	188	22	187	5
15	13	517	19	0.0362	0.0497	0.0022	0.1932	0.0087	0.0282	0.0005	180	73	179	7	179	3
16	6	168	165	0.9812	0.0496	0.0047	0.2026	0.0191	0.0296	0.0006	176	173	187	16	188	4
17	5	148	102	0.6905	0.0500	0.0051	0.2093	0.0211	0.0304	0.0007	193	187	193	18	193	4
18	2	50	29	0.5817	0.0496	0.0175	0.1963	0.0692	0.0287	0.0010	175	548	182	59	182	6
19	7	201	204	1.0147	0.0495	0.0046	0.1953	0.0181	0.0286	0.0006	173	170	181	15	182	4
20	3	96	57	0.5957	0.0498	0.0096	0.1919	0.0366	0.0279	0.0007	186	321	178	31	178	5
21	3	89	44	0.4947	0.0499	0.0087	0.1997	0.0344	0.0290	0.0008	190	300	185	29	184	5
22	7	187	299	1.5995	0.0500	0.0054	0.1990	0.0212	0.0289	0.0006	193	201	184	18	184	4
23	2	74	36	0.4929	0.0501	0.0078	0.2014	0.0309	0.0291	0.0008	201	276	186	26	185	5
24	5	150	129	0.8643	0.0494	0.0054	0.1912	0.0208	0.0281	0.0006	167	204	178	18	178	4

表 4 拉果错堆晶辉长岩锆石 U-Th-Pb 同位素测年数据(L13T2)

Table 4 Zircon U-Th-Pb data of the Laguocuo gabbro cumulates (L13T2)

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb _{rad}	Th ²³²	U ²³⁸		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
01	5	132	140	0.9427	0.0497	0.0046	0.2031	0.0187	0.0295	0.00069	183	164	188	16	188	4
02	2	27	59	0.4668	0.0494	0.0126	0.1925	0.0489	0.0281	0.00102	171	398	179	42	179	6
03	2	0	71	0.0011656	0.0495	0.0155	0.1802	0.0563	0.0263	0.00095	173	481	168	48	168	6
04	7	190	193	0.9860	0.0499	0.0083	0.2048	0.0339	0.0297	0.0007	192	296	189	29	189	4
05	3	44	80	0.5486	0.0497	0.0109	0.2015	0.0437	0.0293	0.00099	183	348	186	37	186	6

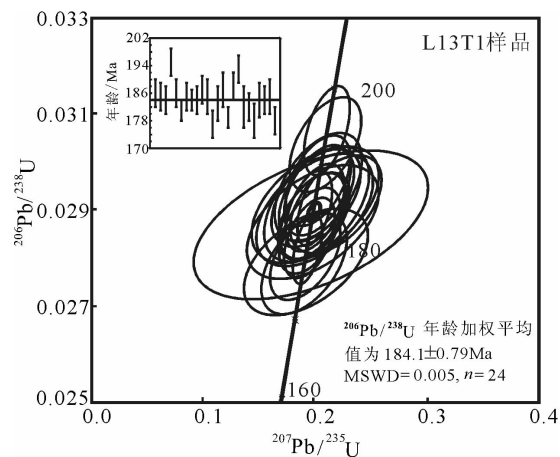


图5 拉果错斜长花岗岩锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄
Fig. 5 Zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸U concordia diagrams of Laguocuo plagioclase granite

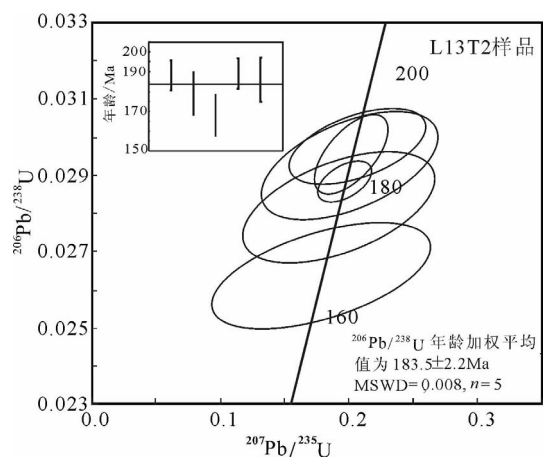


图6 拉果错辉长岩锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄
Fig. 6 Zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸U concordia diagrams of Laguocuo gabbro

点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄较集中(图6),年龄加权平均值为183.5±2.2Ma(MSWD=0.008),代表了拉果错堆晶辉长岩的岩浆结晶年龄(早侏罗世晚期)。

在拉果错蛇绿岩中采集了斜长花岗岩和堆晶辉长岩均获得谐和年龄,分别为184Ma和183Ma,二者均为早侏罗世晚期,代表拉果错蛇绿岩的形成时代。

5.3 锆石Lu-Hf同位素地球化学

为探讨拉果错蛇绿岩的源区特征,本文对拉果错斜长花岗岩进行了Lu-Hf同位素分析。锆石Hf同位素分析点位置和锆石U-Pb测点对应,获得9个锆石测点,分析结果见表5。样品中锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值介于0.282963~0.283121之间。通过锆石Lu-Hf数据分析,获得2组Hf(t)值及Hf模式年龄,

其中一组测点具有正的ε_{Hf}(t)值(14.80~16.12)和较年轻的Hf模式年龄(T_{DM}=191~236Ma; T_{DM}^C=193~264Ma);另一组测点具有正的ε_{Hf}(t)值(10.55~12.75)和稍老的Hf模式年龄(T_{DM}=344~424Ma; T_{DM}^C=384~507Ma)。反映斜长花岗岩的岩浆源区为亏损地幔,但其源区可能由多种成分组成。张玉修^[4]报道过拉果错蛇绿混杂岩来源于DM(亏损地幔)和EM2(Ⅱ型富集地幔)二组分混合的地幔源区。

6 拉果错蛇绿岩构造环境

地球化学特征显示,拉果错斜长花岗岩和辉长岩均具有E-MORB性质,且Lu-Hf同位素显示源区来源于亏损地幔。关于E-MORB的富集组分来

表5 拉果错斜长花岗岩锆石Hf同位素(LT13T1)
Table 5 Zircon Hf isotopic composition of the Laguocuo plagioclase granite (L13T1)

点号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	年龄/Ma	ε _{Hf} (t)	T _{DM} /Ma	T _{DM} ^C /Ma	f _{Lu/Hf}
1	0.282972	0.000052	0.002548	0.000015	0.121317	0.000900	195	11.0	413	487	-0.92
2	0.282962	0.000032	0.002325	0.000009	0.107413	0.000537	186	10.5	424	507	-0.93
3	0.282986	0.000039	0.002726	0.000016	0.131081	0.000911	177	11.1	394	466	-0.91
4	0.283024	0.000041	0.002419	0.000017	0.116751	0.000859	187	12.7	334	384	-0.92
5	0.283107	0.000044	0.002515	0.000008	0.114513	0.000501	186	15.6	211	220	-0.92
6	0.283087	0.000045	0.002776	0.000013	0.129858	0.000425	181	14.8	243	264	-0.91
7	0.283121	0.000035	0.002410	0.000007	0.111720	0.000187	185	16.1	191	193	-0.92
8	0.283104	0.000043	0.002258	0.000002	0.104537	0.000259	184	15.5	215	226	-0.93
9	0.283097	0.000067	0.003832	0.000049	0.183608	0.002230	187	15.1	236	250	-0.88

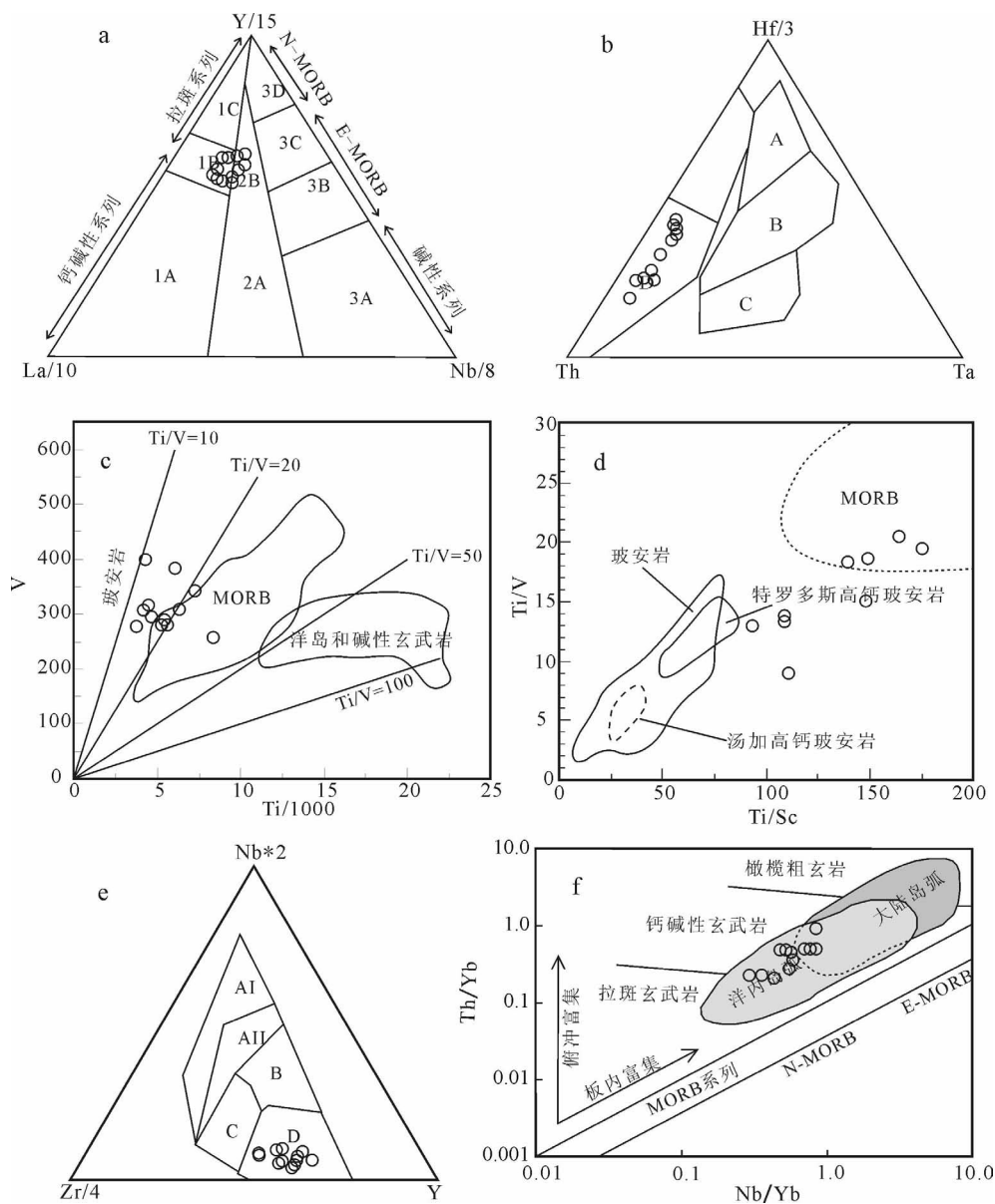


图 7 拉果错辉长岩构造判别图解

Fig. 7 Structure classification diagrams for Laguocuo gabbro

a—Y/15—La/10—Nb/8图解(1A—钙碱性玄武岩;1B—1A和1C的重叠部分;1C—火山弧拉斑玄武岩;2A—大陆玄武岩;2B—弧后盆地玄武岩;3A—碱性玄武岩;3B和C—E-MORB;3D—N-MORB^[28];N-MORB—正常大洋中脊玄武岩;E-MORB—富集大洋中脊玄武岩);b—Hf/3—Th—Ta图解(A—亏损MORB区域;B—富集MORB区;C—板内玄武岩区;D—岛弧玄武岩区);c—Ti/1000—V图解(岛弧玄武岩和大洋中脊玄武岩的Ti/V值据参考文献[31],弧后盆地玄武岩区域据参考文献[29];MORB—大洋中脊玄武岩);d—Ti/Sc—Ti/V;e—Nb×2—Zr/4—Y图解(A I + A II—板内碱性玄武岩;A II + C—板内拉斑玄武岩;B—E型洋中脊玄武岩;D—正常洋中脊玄武岩;C + D—火山弧玄武岩^[30]);f—Nb/Yb—Th/Yb图解

源,主要有以下几种观点:来源于地幔柱、拆沉的大陆岩石圈的重熔、混染的亏损大洋岩石圈、混染的原始地幔再循环、大洋高原的再循环、再循环的洋

壳和沉积物及大陆地壳的再循环^[17-27]。

由于基性岩的构造判别图解相对酸性岩准确性更高,因此,本文选取辉长岩地球化学特征及投

图来判断拉果错蛇绿岩的构造环境。辉长岩的地球化学分析结果显示,其具有E-MORB的稀土元素配分形式和微量元素特征,同时具有岛弧的特点。在Y-La-Nb图解(图7-a)中,辉长岩落入岛弧拉斑玄武岩和弧后盆地玄武岩的交界处,在Hf-Th-Ta图解(图7-b)中,辉长岩均落入岛弧玄武岩区;在Ti/1000-V图解(图7-c)中,辉长岩落入弧后盆地玄武岩及岛弧玄武岩区;在Ti/Sc-Ti/V图解(图7-d)中,辉长岩大部分投到MORB(大洋中脊玄武岩)内;在Nb-Zr-Y图解(图7-e)中,所有辉长岩落入正常洋中脊玄武岩区。综合以上分析,辉长岩具有MORB性质,且构造环境具有岛弧环境的亲缘性。在高场强元素和稀土元素比值图解(图7-f)中,辉长岩样品均投到洋内岛弧区域内。上述特征说明,拉果错蛇绿混杂岩可能形成于具有强烈MORB特征的洋内弧后盆地。

拉果错斜长花岗岩和辉长岩地球化学特征显示,均富集Th、U、Pb,可能与壳源及沉积物的加入有关;亏损Nb、Ta、Ti,暗示与俯冲作用有关;拉果错斜长花岗岩具有正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,说明其岩浆来源于地幔,无陆壳物质的混染,进一步证明了洋内俯冲。此外,拉果错蛇绿岩方辉橄榄岩中尖晶石的Cr[#]值(0.53~0.57)也指示了俯冲带环境^[4]。综合以上研究,笔者认为,拉果错蛇绿岩产于洋内弧后盆地环境,其中的斜长花岗岩和堆晶辉长岩形成于俯冲带环境。

7 结 论

(1)拉果错蛇绿岩主要由超基性杂岩、辉长杂岩、基性岩墙、基性火山杂岩、斜长岩、放射虫硅质岩等构造单元组成。

(2)拉果错斜长花岗岩与辉长岩具有相似的微量元素特征,显示E-MORB的性质,微量元素特点显示形成过程中有洋壳及沉积物的加入,与俯冲作用有关。斜长花岗岩存在2组正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及Hf模式年龄,反映斜长花岗岩的岩浆源区为亏损地幔,可能来源于DM和EM2二组分混合的地幔源区。

(3)拉果错斜长花岗岩和辉长岩分别获得 $184.1 \pm 0.79 \text{ Ma}$ 和 $183.5 \pm 2.2 \text{ Ma}$ 的谐和年龄,表明拉果错蛇绿岩形成于早侏罗世晚期。

(4)拉果错蛇绿岩形成于弧后盆地环境。

致谢:野外工作得到吉林大学吴浩、刘一鸣、许伟、张天羽、李兴奎博士等的帮助和支持,审稿专家提出了建设性的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 林文第,陈德泉. 藏北改则—色哇地区的蛇绿岩特征[J]. 成都地质学院学报, 1990, 17(2): 17-25.
- [2] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [3] 肖序常. 青藏高原的构造演化与隆升机制[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000.
- [4] 张玉修. 西藏改则南拉果错蛇绿岩中斜长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb年代学及其成因研究[J]. 科学通报, 2007, 52(1): 100-106.
- [5] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [6] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 521-533.
- [7] 潘桂棠, 丁俊, 姚东生, 等. 青藏高原及邻区地质图[M]. 成都: 成都地质出版社, 2003: 1-47.
- [8] 李金高, 德曲. 措勤—纳木错缝合带特征及其找矿意义探讨[J]. 西藏地质, 1993, (2): 38-45.
- [9] 西藏自治区地质调查院. 1:25万改则县幅区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [10] 王保弟, 许继峰, 曾庆高, 等. 西藏改则地区拉果错蛇绿岩地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1521-1530.
- [11] 樊帅权, 史仁灯, 丁林, 等. 西藏改则蛇绿岩中斜长花岗岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(5): 467-478.
- [12] 徐建鑫. 藏北班公湖—怒江缝合带侏罗纪洋岛型岩石组合: 来自岩石学和地球化学的证据[J]. 地质通报, 2014, 23(11): 1793-1803.
- [13] 于红. 陕西商南松树沟橄榄岩矿物地球化学特征及成因机理示踪[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2011.
- [14] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 357-370.
- [15] Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. Improved insitu Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2012, 27: 1391-1399.
- [16] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb同位素标准锆石的Hf同位素[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1404-1410.
- [17] Schilling J G, Thompson G, Kingsley R, et al. Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic[J]. Nature, 1985, 313(5999): 187-191.
- [18] Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3): 273-296.

- [19]Gasperini D, Blichert-Toft J, Bosch D, et al. Evidence from Sardinian basalt geochemistry for recycling of plume heads into the Earth's mantle[J]. *Nature*, 2000, 408(6813): 701–704.
- [20]Tatsumi Y. Continental crust formation by crustal delamination in subduction zones and complementary accumulation of the enriched mantle I component in the mantle[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 1(12):874–903.
- [21]Niu Y, O'Hara M J. Origin of ocean island basalts: A new perspective from petrology, geochemistry, and mineral physics considerations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108 (B4), 2209:1–18.
- [22]Donnelly K E, Goldstein S L, Langmuir C H, et al. Origin of enriched ocean ridge basalts and implications for mantle dynamics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(3/4):347–366.
- [23]Workman R K, Hart S R, Jackson M, et al. Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II(EM2) end-member: Evidence from the Samoan volcanic Chain[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(4): 1–44.
- [24]Lustrino M. How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 72(1/2): 21–38.
- [25]Chauvel C, Lewin E, Carpentier M, et al. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf – Nd mantle array[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(1): 64–67.
- [26]Jackson M G, Dasgupta R. Compositions of HIMU, EM1, and EM2 from global trends between radiogenic isotopes and major elements in ocean island basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 276(1/2): 175–186.
- [27]Willbold M, Stracke A. Formation of enriched mantle components by recycling of upper and lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2010, 276(3/4): 188–197.
- [28]Shervais J W. Ti–V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 59(1): 101–118.
- [29]Metzger E P, Miller R B, Harper G D. Geochemistry and tectonic setting of the ophiolitic ingalls complex, North Cascades, Washington: Implications for correlations of Jurassic Cordilleran ophiolites[J]. *The Journal of Geology*, 2002, 110(5): 543–560.
- [30]Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56:207–218.
- ①西藏自治区地质调查院. 中华人民共和国 1:5 万拉过错幅区域地质调查报告. 2013.
- ②四川省地质调查院. 1:25 万物玛幅区域地质调查报告. 2006.